1К

УДК 621.317.7

В.П. Куценко[1,2], О.П. Яненко[3]
[1]Науково-виробниче підприємство «Кварсит», Укроборонпром, м. Костянтинівка
Україна, 85104, м. Костянтинівка, Донецької обл., вул. Шмідта, 20
[2] Донецький національний технічний університет МОН, м. Донецьк, Україна
Україна, 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58
[3] Національний технічний університет України «КПІ» МОН, м. Київ, Україна
Україна, 03056, м. Київ, Соломенський р-н, пр. Перемоги, 37

Зразковий генератор шуму НВЧ-діапазону для метрологічного забезпечення радіометричних приладів контролю

V.P. Kutsenko[1,2], O.P. Yanenko[3]
[1]Scientific production enterprise of «Kvarsit», Ukroboronprom, Konstantinovka, Ukraine
Ukraine, 85104, Konstantinovka, Donetsk obl., Shmidta st, 20
[2] the Donetsk national technical university, MON, Donetsk, Ukraine
Ukraine, 83000, Donetsk, street of Artem, 58
[3] National technical university of Ukraine «KPI» MON, Kyiv, Ukraine
Ukraine, 03056, Kyiv, Solomenskiy district, boulevard of Victory, 37

Exemplary Generator of Noise OHF-Range for the Metrology Providing of Aerophare Devices of Control

В.П. Куценко[1,2], А.Ф. Яненко[3]
[1] Научно-производственное предприятие «Кварсит», Укроборонпром, г. Константиновка
Украина, 85104, г. Константиновка, Донецкой обл., ул. Шмидта, 20
[2] Донецкий национальный технический университет МОН, г. Донецк, Украина
Украина, 83000, г. Донецк, ул. Артема, 58
[3] Национальный технический университет Украины «КПИ» МОН, г. Киев
Украина, 03056, г. Киев, Соломенский р-н, пр. Победы, 37

Образцовый генератор шума СВЧ-диапазона для метрологического обеспечения радиометрических приборов контроля

У статті розглянуто пристрій для метрологічного забезпечення радіометричних приладів контролю методом заміщення. Щодо цього розроблений зразковий генератор НВЧ-діапазона з тепловим джерелом електромагнітного шуму, що має низьку температуру робочого тіла. Розрахована похибка формування потужності еталонного шуму, побудовані залежності вихідної потужності від значень регулювання температури генератора і похибки формування вихідної потужності генератора на погодженому зовнішньому навантаженні.
Ключові слова: зразковий генератор, електромагнітний шум, контроль, метрологія.

For the metrology providing of aerophare devices of control of substitution a method an exemplary generator is developed OHF-range with the thermal source of electromagnetic noise, having a low temperature of working body. The error of forming of power of standard noise is expected, dependences of vikhodnoy power are built on the values of regulation of temperature of generator and error of forming of vikhodnoy power of generator on the concerted external loading.
Key words: exemplary generator, electromagnetic noise, control, metrologiya.

В статье рассмотрено устройство для метрологического обеспечения радиометрических приборов контроля методом замещения. Для этого разработан образцовый генератор СВЧ-диапазона с тепловым источником электромагнитного шума, имеющего низкую температуру рабочего тела. Рассчитана погрешность формирования мощности эталонного шума, построены зависимости выходной мощности от значений регулировки температуры генератора и погрешности формирования выходной мощности генератора на согласованной внешней нагрузке.
Ключевые слова: образцовый генератор, электромагнитный шум, контроль, метрология.

Вступ

Розробка високочутливих радіометричних приладів контролю (РПК) потребує наявність зразкових генераторів шуму (ГШ). Дане питання гостро постає при контролі складу та властивостей технологічних виробів за рахунок вимірювання їх власних випромінювань (ЕМВ) низької інтенсивності в НВЧ-діапазоні із застосуванням нестандартизованої радіометричної апаратури [1-3]. Однією із основних вимог, пред'явленою до неї, є вимірювання з високим ступенем точності даних випромінювань, інтенсивність яких складає 10^{-13}...10^{-14} Вт, а реєстрація їх є достатньо важкою задачею.

Застосування у складі радіометричних систем стандартних апаратів і вузлів дає можливість отримати оцінку похибки вимірювань, виходячи із нормованих значень похибок. За обчисленням вона складає 30 – 40%, що не завжди прийнятно.

Для зменшення величини похибки, необхідно застосувати метод заміщення при наявності зразкового ГШ. Однак відомі стандартні ГШ, як високотемпературні, так і низькотемпературні, в основному призначені для роботи в діапазонах частот, що лежать нижче 37,5 ГГц [4].

Крім того, розроблені ГШ містять перехідну секцію, що представляє собою відрізок лінії передачі (хвилеводу) достатньо великої довжини та з'єднує джерело електромагнітного шуму з вихідним фланцем генератора. Вказана секція сама є важковраховуючим джерелом шуму, що, як наслідок, веде до росту похибки вимірювань.

Постановка задачі дослідження. Для зменшення величини похибки при метрологічному забезпеченні розроблених радіометричних приладів контролю із застосуванням методу заміщення необхідна розробка зразкового генератору шуму НВЧ-діапазону з більш кращими характеристиками, ніж відомі стандартні генератори.

Основна частина

Перехідна секція є неідеально узгодженим пасивним чотириполюсником, що має втрати. У випадку калібрування РПК, або вимірюваннях методом заміщення з'єднує також неідеально узгоджені ГШ і вхідний тракт РПК.

Як показано в [4] коефіцієнт корисної дії чотириполюсника складає:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(Z_{BX} / Z_{BИX}) \cdot |S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_H|^2)}{(1 - |\Gamma_1|^2) \cdot |1 - S_{22}\Gamma_H|^2}, \quad (1)$$

за умови $Z_{BX} = Z_{BИX}$ (вхід ГШ і РПК являють собою хвилеводи однакового перерізу) виходить

$$\eta = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_H|^2)}{(1 - |\Gamma_1|^2) \cdot |1 - S_{22}\Gamma_H|^2}. \quad (2)$$

Доля шумів на виході чотириполюсника, яка обумовлюється його неузгодженням і втратами,

$$\alpha = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_G|^2)}{(1 - |\Gamma_2|^2) \cdot |1 - S_{11}\Gamma_G|^2}. \quad (3)$$

Із формул (1) і (2) видно, що наявність перехідної секції, навіть недисипативної, приводить до втрат внаслідок неідеальності узгодження. Таким чином, калібрування РПК буде проводитися тим точніше, чим α і η ближче до 1, чи так само $S_{21}\to 1$, $S_{11}\to 0$, Γ_1 і $\Gamma_G\to 1$. Для зниження похибки вимірювань слід виключити перехідну секцію в зразковому ГШ, а його вхід, як і вхід РПК, узгодити як можна краще.

На рис. 1 представлена схема калібрування РПК з використанням зразкового ГШ.

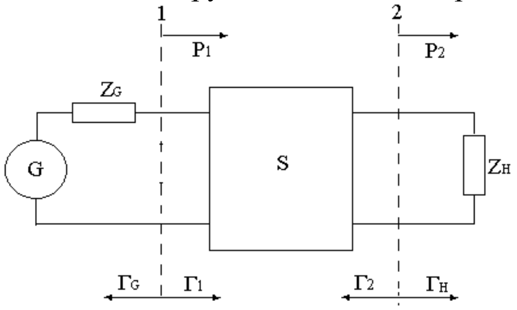


Рисунок 1 – Схема калібрування РПК: S – чотириполюсник, з'єднуючий ГШ G зі входом РПК; що характеризується матрицею розсіювання; S_{11}, S_{22} – коефіцієнт відбиття хвилі відповідно входу і виходу; S_{12}, S_{21} – коефіцієнт передачі (вхід-вихід, вихід-вхід); Z_G і Z_H – характеристичні опори ГШ і навантаження; Z_{BX} і $Z_{BИX}$ – характеристичні опори входу і виходу з'єднуючого чотириполюсника; Γ_1, Γ_2, Γ_H, Γ_G – коефіцієнти відбиття, які відповідають входу і виходу чотириполюсника, навантаження і ГШ; P_1, P_2 – падаюча та відповідно вимірювана потужності

При вимірюванні методом заміщення зовнішнього ЕМВ не можна виключити перехідний чотириполюсник, оскільки, внаслідок розкиду значень потужності випромінювань, що вимірюються, необхідно застосовувати прецизійний атенюатор, який і буде згаданим чотириполюсником.

Схема вимірювання ЕМВ джерела шуму представлена на рис. 2, на якому введені наступні позначення: $T_G(T_X)$ – джерело шуму, яким може бути зразковий ГШ потужності $P_G = kT_G$; потужність випромінювання виробу, що контролюється, $P_x = kT_x$; Γ_G і Γ_X – відповідні їм коефіцієнти відбиття; $S(T_A)$ – перехідний чотириполюсник (атенюатор) з шумовою температурою T_A; V – коефіцієнт, який характеризує ступінь узгодження входу РПК з перехідним чотириполюсником. В загальному випадку він дорівнює (згідно з рис. 1)

$$V = \frac{(1-|\Gamma_H|^2)\cdot(1-|\Gamma_2|^2)}{|1-\Gamma_H\Gamma_2|^2} \quad . \tag{4}$$

Із наведеної схеми (рис. 2) і формули (4) слідує, що потрібно максимально спростити перехідний чотириполюсник (тобто знизити його шумову температуру T_A) і узгодити вхід РПК (наблизивши значення V до 1).

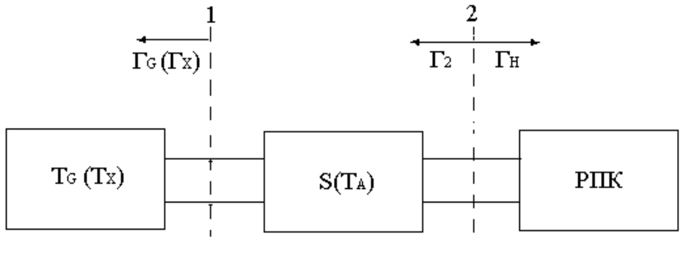


Рисунок 2 – Структурна схема вимірювання потужності джерела шуму

Шумова потужність, що поступає на вхід системи (тобто в площині 2 на рис. 1 і рис. 2), яка дорівнює kVT, включає в себе потужність, що поступає від ГШ (чи виробу) $P' = kT_{G(X)}V\alpha$ і потужність шуму, яка генерується в самому чотириполюснику $P'' = kVT_A(1—\alpha)$. Таким чином

$$kVT = kV[T_{G(X)}\alpha + T_A(1-\alpha)] \;, \tag{5}$$

де α – затухання прецизійного атенюатора.

При методі заміщення до входу РПК спочатку підключається антена, яка направлена на виріб, що контролюється, і вводиться затухання атенюатора α_X, потім замість антени підключається зразковий ГШ і вводиться затухання атенюатора α_G. І в тому, і в іншому випадку на вхід РПК повинна поступати одна й та сама потужність. Таким чином, маємо рівняння балансу потужності:

$$kVT_G\alpha_G + kVT_A(1-\alpha_G) = kVT_X\alpha_X + VT_A(1-\alpha_X)]. \tag{6}$$

Або

$$T_X = (T_G - T_A)\frac{\alpha_G}{\alpha_X} + T_A. \tag{7}$$

З урахуванням формули (3) маємо:

$$\frac{\alpha_G}{\alpha_X} = \left|\frac{1-S_{11}\Gamma_X}{1-S_{11}\Gamma_G}\right|^2 \left(\frac{1-|\Gamma_G|^2}{1-|\Gamma_X|^2}\right)\frac{|S_{21}|_G^2}{|S_{21}|_X^2}. \tag{8}$$

При цьому передбачається, що елементи матриці розсіювання S_{11} і S_{22}, які характеризують відбиття електромагнітних хвиль від входу і виходу атенюатора, не змінюються так, як і його шумова температура T_A, в той час як елемент матриці S_{21}, буде мінятися, оскільки змінюється затухання самого атенюатора.

На практиці зазвичай складно врахувати коефіцієнти відбиття Γ_x і Γ_G, рівно як і елемент матриці розсіювання S_{11}, оскільки – це комплексні величини, для визначення яких потрібно точно вимірювати не тільки модуль, але і фазу сигналу. Останнє в НВЧ-діапазоні є важкою задачею. Внаслідок цього маємо похибку неузгодження:

$$\delta\Gamma \approx 2|S_{11}|(|\Gamma_X| + |\Gamma_G|). \tag{9}$$

Для її зменшення необхідно узгодити вхід РПК таким чином, щоб $S_{11} \sim 0$. Коефіцієнти відбиття за потужністю для зразкового генератора ($|\Gamma_G|^2$) і ($|\Gamma_X|^2$) виходу приймальної антени ($|\Gamma_A|^2$) зазвичай дуже малі. Отже при виконанні вказаних умов:

$$\frac{\alpha_G}{\alpha_X} \approx \frac{|S_{21}|_G^2}{|S_{21}|_X^2} \;. \tag{10}$$

Похибка при вимірюванні потужності ЕМВ-об'єкта методом заміщення обумовлюється чотирма причинами:

1) похибкою внаслідок неузгодженості між входом РПК і виходом приймальної антени, включаючи перехідний чотириполюсник (наприклад, атенюатор):

$$(\delta T_X)_{BX} \le \left[1 - \left(\frac{1+|S_{11}\Gamma_X|}{1-|S_{11}\Gamma_G|}\right)^2\right]\left(\frac{1-|\Gamma_G|^2}{1-|\Gamma_X|^2}\right)\frac{|S_{21}|_G^2}{|S_{21}|_X^2}(T_G - T_A) \approx 2|S_{11}|(|\Gamma_X| + |\Gamma_G|)T_X, \tag{11}$$

2) похибкою при калібруванні

$$(\delta T_X)_{S_{21}} \le \left[\left|\frac{1-S_{11}\Gamma_X}{1-S_{11}\Gamma_G}\right|\right]\left(\frac{1-|\Gamma_G|^2}{1-|\Gamma_X|^2}\right)\frac{|S_{21}|_G^2}{|S_{21}|_X^2}(T_G - T_A)\delta\left(\frac{|S_{21}|_G^2}{|S_{21}|_X^2}\right), \tag{12}$$

3) нестабільністю температури зразкового ГШ T_G:

$$(\delta T_X)_{T_G} \le \frac{\alpha_G}{\alpha_X}\delta T_G \approx T_X\frac{\delta T_G}{T_G}, \tag{13}$$

4) похибкою вимірювання T_A

$$(\delta T_X)_{T_A} \le \left|1-\frac{\alpha_G}{\alpha_X}\right|\delta T_A \approx \left|1-\frac{|S_{21}|_G^2}{|S_{21}|_X^2}\right|\delta T_A. \tag{14}$$

Всі перераховані джерела похибки висувають до зразкового ГШ наступні вимоги:

1) з метою зменшення похибки із-за неузгодженості, окрім настройки вхідного тракту на мінімальний коефіцієнт відбиття (S_{11} – мало) і створення приймальної антени, узгодженої по виходу з вхідним трактом РПК, необхідно забезпечити коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН) на рівні 1,1...1,15, що відповідає відбиттю 0,23 – 0,48% потужності шуму обернено в ГШ. У формулі (11) це відповідає зменшенню другого співмножника;

2) для зменшення похибки, пов’язаної з калібруванням, бажано вибирати температуру зразкового ГШ приблизно рівною температурі виробів, що контролюються. Для того, щоб зменшити відношення затухань, які вводяться атенюатором $|S_{21}|_G^2$ і $|S_{21}|_X^2$, зразковий ГШ повинен мати регулювання температури з урахуванням властивостей виробів, що контролюються, у межах від 20° до 50°С;

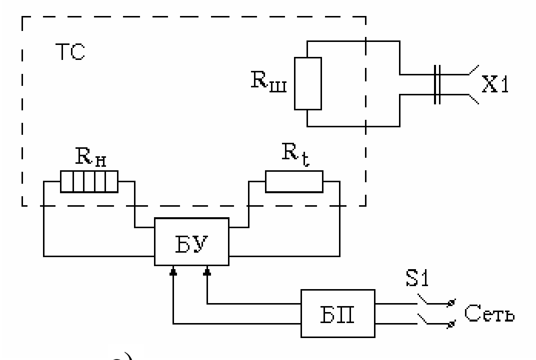
3) необхідно з високою точністю забезпечувати постійність температури електромагнітного шуму зразкового ГШ. Його конструкція повинна включати в себе термостат і теплову ізоляцію вихідного хвилевідного фланцю при високій електропровідності, тобто $\delta T_G \approx 0$ і згідно з (13) $\delta T_X \approx 0$;

4) з метою зменшення похибки вимірювання, зв’язаної з невизначеністю потужності шуму kT_A , яка генерується перехідним чотириполюсником, необхідно відмовитися від різних перехідних секцій, які використовуються в стандартних еталонних генераторах для з’єднання джерела шуму зі входом вимірювальної системи. Таким чином, перехідний чотириполюсник при вимірюваннях буде складатися тільки із прецизійного атенюатора, який є досить масивним, має постійну кімнатну температуру, що відповідає $\delta T_A \approx 0$ і відповідно до формули (14), похибка, яка розглядається, також близька до 0.

З урахуванням вищеперерахованих вимог для нестандартизованих РПК був розроблений зразковий ГШ НВЧ-діапазону з тепловим джерелом електромагнітного шуму (рис. 3), який має низьку температуру робочого тіла (20...50°С), оскільки рівень вихідної потужності за смуги РПК $\Delta f = 10^8$ Гц складає $P_{\min} = 4{,}04 \cdot 10^{-13}$ Вт, $P_{\max} = 4{,}45 \cdot 10^{-13}$ Вт, що на порядок більше від чутливості РПК.

Конструкція ГШ включає джерело шуму ($R_Ш$), що складається із відрізку прямокутного хвилеводу (Хв), усередині якого находиться клин із радіопоглинального матеріалу з підведеним нагрівальним елементом ($R_Н$). Для забезпечення постійності температури, джерело шуму разом із нагрівачем розміщені в теплоізолюючому корпусі термостата (ТС). У склад термостата входить датчик температури (R_t), джерела шуму, теплоізолю-

ючий фільтр (ТФ), який забезпечує передачу потужності від джерела електромагнітного шуму на вихід генератора (Вих). Температура нагрівання задається за допомогою блока управління (БУ) і блока живлення (БП).



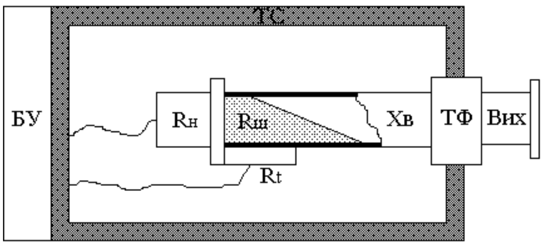


Рисунок 3 − Структурна схема (а) і конструкція робочої головки (б) зразкового ГШ

Враховуючи високу чутливість РПК, рівень вихідної потужності ГШ може відрізнятися в 5...10 разів і складати (1...5)×10^{-13} Вт, що забезпечує незначний градієнт температури генератора по відношенню до навколишнього середовища. Використання такого ГШ відкриває можливість забезпечення високих метрологічних характеристик РПК.

Найбільший вплив на похибку формування рівня вихідної потужності мають розкид коливання температури в термостаті та значний рівень і нерівномірність коефіцієнта стоячої хвилі виходу ГШ. Коливання температури джерела шуму знаходиться в межах $\Delta T = \pm 0{,}5^o C$, а робочий цикл схеми регулювання – близько 10 хвилин.

Похибка формування потужності еталонного шуму визначається формулою

$$\delta P_T = \frac{P_G - P'_G}{P_G} \cdot 100\%, \qquad (15)$$

де P_G − номінальне значення потужності шуму для заданої температури (313 К); P'_G − фактична потужність з урахуванням коливань температури на ± 0,5°С; $P'_{G1} = 4{,}3263 \cdot 10^{-13}$ Вт; $P'_{G2} = 4{,}3125 \cdot 10^{-13}$ Вт.

Підставивши значення P_G і P'_G в (6.70) отримуємо δP =±0,16%.

Розподіл вихідної потужності в межах регулювання температур ГШ має лінійний характер, що дозволяє з високою точністю відградуювати його шкалу (рис. 4).

Важливою характеристикою генератора еталонного шуму є коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (K_{KCXG}), який має розкид в межах 1,04...1,1.

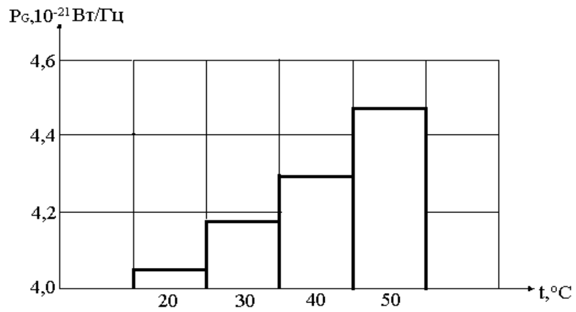


Рисунок 4 − Розподіл вихідної потужності в межах регулювання температур ГШ

Потужність, що проходить в зовнішнє узгоджене навантаження за його підключення до ГШ,

$$\Delta P_{KCX} = P_G (1 - |\Gamma_G|^2). \qquad (16)$$

Абсолютна похибка установки вихідної потужності з урахуванням (6.70) має вигляд

$$\delta P_{K_{KCXG}} = |\Gamma_G|^2 = \left| \frac{K_{KCXG} - 1}{K_{KCXG} + 1} \right|. \qquad (17)$$

Графік розподілу похибки формування вихідної потужності ГШ за можливих значень коефіцієнта стоячої хвилі наведений на рис. 5.

Похибка $\delta P_{K_{KCXG}}$ знаходиться в межах 0,04...0,21%, максимальний рівень якої за досягнутого значення K_{KCXG} =1,1; $\delta P_{K_{KCXG}} \approx 0{,}21\%$.

Сумарна похибка формування потужностей еталонного шуму та використання ГШ в узгодженому режимі:

$$\delta P_{\Sigma} = \sqrt{\delta P_T + \delta P_{K_{KCXG}}} = \sqrt{0{,}0256 + 0{,}0441} = 0{,}26\%. \qquad (18)$$

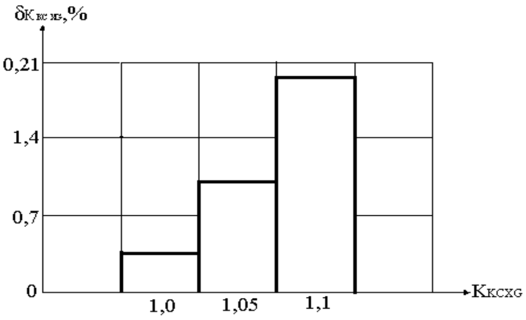


Рисунок 5 − Розподіл похибки формування вихідної потужності ГШ
на узгодженому зовнішньому навантаженні

Розрахована максимальна сумарна похибка генератора $\delta P_{\Sigma} = 0{,}26\%$ дозволяє віднести ГШ до засобів вимірювання, придатних для оцінки метрологічних параметрів високочутливих РПК.

Даним вимогам відповідає розроблений ГШ, який пройшов державну метрологічну атестацію в Національному науково-дослідному центрі «Інститут метрології», м. Харків.

Висновки

Таким чином розроблений авторами ГШ має лінійну залежність вихідної потужності в межах регулювання температур. Найбільший вплив на похибку формування рівня вихідної потужності мають розкид коливання температури в термостаті та нерівномірність коефіцієнта стоячої хвилі виходу ГШ.

Розрахована максимальна сумарна похибка ГШ становить 0,26%, що дозволяє віднести його до засобів вимірювання, придатних для оцінки метрологічних параметрів високочутливих РПК.

Література

1. Скрипник Ю.О. Модуляційні радіометричні пристрої та системи НВЧ-діапазону : [навч. посібник] / Скрипник Ю.О., Манойлов В.П., Яненко О.П. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 374 с.

2. Радіометричний НВЧ-контроль властивостей матеріалів / [Куценко В.П., Скрипник Ю.О., Трегубов М.Ф. и др.]. – Донецьк : ІПШІ «Наука і освіта», 2012. – 348 с.
3. Куценко В.П. Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии / [Куценко В.П., Скрипник Ю.А., Трегубов Н.Ф. и др.]. – Донецьк : ІПШІ «Наука і освіта», 2011. – 324 с.
4. Рабинович С.Г. Погрешности измерений / Рабинович С.Г. – Л. : Энергия, 1978. – 261 с.

Literatura

1. Syzdalcev E.I. Radiotransparent, high-heat-resistant materials of the XXI century / Syzdalcev E.I. // Are Refractories and technical ceramics. – 2002. – № 3. – С. 42-48.
2. Kutsenko V.P. Aerophare UHP-control of properties of materials / [Kutsenko V.P., Skripnik Yu.A., Tregubov N.F. et al.]. – Donetsk : IPSHI «Science and education», 2012. – 348 s.
3. Kutsenko V.P. Methods and facilities of super-high-frequency radiometry / [Kutsenko V.P., Skripnik Yu.A., Tregubov N.F. et all.]. – Donetsk : IPSHI «Science and education», 2011. – 324 s.
4. Rabinovich S.G. Errors of Measurements / Rabinovich S.G. – L. : Energy, 1978. – 261 s.

RESUME

V.P. Kutsenko, O.P. Yanenko

Exemplary Generator of Noise OHF-Range for the Metrology Providing of Aerophare Devices of Control

Development of highly sensitive aerophare devices of control requires presence of exemplary generators of noise. This question sharply becomes at control of composition and properties of technological wares due to measuring of them own radiations of low intensity in an OHF-range with application of the unstandardized aerophare apparatus.

For diminishing of size of error at the metrology providing of the developed aerophare devices of control with application of method of substitution necessary development of exemplary a generator noise of OHF-range with the more best descriptions than standard generators are known.

For the metrology providing of aerophare devices of control of substitution a method the exemplary generator of OHF-diapazona is developed with the thermal source of electromagnetic noise which has a low temperature of working body. Expected error of forming of power of standard noise, built dependences of vikhydnoy power on the values of adjusting of temperature of generator and error of forming of initial power of generator on the concerted external loading.

The use of such generator of noise is opened by possibility of providing of high metrology descriptions of aerophare devices of control.

Стаття надійшла до редакції 11.01.2013.